Iranian Journal of Pulses Research
Vol. 12, No. 1, 2021, p. 187-204 (Research Article)
DOI: 10.22067/ijpr.v12i1.75861

پژوهش‌های حبوبات ایران
سال(دوره) ۱۲ شمارهٔ۱، نیمهٔ اوّل ۱۴۰۰
صفحهٔ ۲۰۴-۱۸۷، نوع مقاله: پژوهشی

گزینش ژنوتیپ‌های منتخب عدس (*Lens culinaris* Medik) متحمل به تنش خشکی با به‌کارگیری پنج شاخص تحمل جدید در شرایط مشهد

محمدحسن وفایی[۱]، مهدی پارسا[۲]*، احمد نظامی[۳] و علی گنجعلی[۴]
۱. عضو هیئت علمی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا؛ m.vafaei@basu.ac.ir
۲. عضو هیئت علمی دانشکده کشاورزی و پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد
۳. عضو هیئت علمی دانشکده کشاورزی و پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد؛ nezami@um.ac.ir
۴. عضو هیئت علمی دانشکده علوم و پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد؛ ganjeali@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۶

چکیده
به‌منظور ارزیابی و انتخاب ژنوتیپ‌های عدس منتخب متحمل به تنش خشکی و بررسی کارآیی شاخص‌های قدیمی و جدید تحمل به تنش، پژوهشی در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و تحت دو شرایط رطوبتی عدم تنش خشکی (تأمین ۱۰۰درصد نیاز آبی گیاه) و تنش خشکی (تأمین ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه) بر روی ۹ ژنوتیپ برگزیده از بین ۷۳ ژنوتیپ مورد بررسی در آزمایش زراعی سال قبل، اجرا گردید. برای اعمال دقیق محدودیت آبی، از سیستم آبیاری قطره‌ای نواری استفاده شد و میزان آب ورودی توسط کنتور مورد پایش قرار گرفت. بر اساس نتایج، در شرایط بدون تنش، ژنوتیپ‌های MLC356 و MLC121 به ترتیب، با تولید ۲۶۲۱ و ۹۹۳ کیلوگرم دانه در هکتار، بالاترین و پایین‌ترین رتبه تولید دانه در واحد سطح را به خود اختصاص دادند. در شرایط تنش نیز ژنوتیپ‌های Cabralinta و MLC121 به‌ترتیب، با تولید ۸۷۶ و ۲۸۸ کیلوگرم دانه در هکتار، بالاترین و پایین‌ترین رتبه تولید دانه در واحد سطح را کسب کردند. ارزیابی تحمل به تنش خشکی، بر اساس هشت شاخص قدیمی (HM، TOL، MP، STI، GMP، YI، DI و REI) و پنج شاخص جدید (SSPI، ATI، SNPI، K_1STI و K_2STI) صورت گرفت. مطالعهٔ همبستگی بین عملکرد دانه در شرایط تنش و عدم تنش و شاخص‌های تحمل به خشکی نشان داد که شاخص جدید K_2STI و شاخص‌های قدیمی STI، GMP، REI، HM و MP برای شناسایی ژنوتیپ‌هایی با عملکرد بالا در هر دو شرایط رطوبتی (تنش و بدون تنش) مناسب هستند. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و ترسیم بای‌پلات نیز نشان داد که شاخص‌های جدید SNPI و K_2STI و شاخص‌های قدیمی YI، HM، GMP، REI و STI بهترین شاخص‌ها برای جداسازی ژنوتیپ‌های در هر دو شرایط رطوبتی هستند و بر این اساس، ژنوتیپ‌های MLC356، Cabralinta و MLC025 به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی و با عملکرد بالا انتخاب شدند. برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها، تجزیه خوشه‌ای انجام گرفت و رسم دندروگرام، ژنوتیپ‌ها را به چهار کلاستر گروه‌بندی کرد که در این گروه‌بندی، Cabralinta و MLC025 در یک کلاستر (کلاستر دوم) قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: بای‌پلات، تجزیه کلاستر، عملکرد دانه، همبستگی

مقدمه
در بین تنش‌های غیرزیستی، خشکی مهم‌ترین تنش تأثیرگذار در کاهش عملکرد گیاهان زراعی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود و یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های تولید در این مناطق است (Kafi *et al.*, 2009; Reddy *et al.*, 2004). ایران با داشتن متوسط بارندگی ۲۵۷میلی‌متر در سال، در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد (FAO, 2018). عدس گیاهی غنی از پروتئین بوده و حاوی همهٔ هشت اسیدآمینه ضروری لازم برای رشد انسان‌های بزرگسال می‌باشد. این گیاه با داشتن مقدار قابل‌توجهی از مواد معدنی، ویتامین‌ها و ۱۸ اسیدآمینه از ۲۰اسیدآمینه شناسایی‌شده، جایگاه مهمی در رژیم غذایی انسان، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه دارد (Anoma *et al.*, 2014). در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴، سطح زیرکشت عدس کشور ۱۳۱۴۵۴ هکتار بود که حدود ۹۵ درصد آن به‌صورت دیم بوده است. استان خراسان رضوی نیز با داشتن سطح زیرکشت ۲۲۴۰ هکتار عدس، یکی از مراکز تولید این گیاه در کشور است (Agricultural Statistics, 2016).

* نویسنده مسئول: parsa@um.ac.ir

تحمل به خشکی صفتی کیفی است و برای اندازه‌گیری مستقیم آن روش واحدی وجود ندارد و همین موضوع، موجب مشکل‌شدن شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی می‌شود (Takeda & Matsuoka, 2008). طی سالیان طولانی گذشته تصور می‌شد که عملکرد دانه، تحت شرایط تنش خشکی، دارای وراثت‌پذیری پایینی است و دلیل این امر را کنترل ژنتیکی پیچیدۀ این صفت و همچنین برهمکنش شدید ژنوتیپ در محیط می‌دانستند (Dixit *et al.*, 2014). نتایج پژوهش‌های اخیر در مرکز تحقیقاتی ایری[۱] وراثت‌پذیری متوسط تا زیاد صفت عملکرد دانه تحت تنش خشکی را نشان داده است؛ به همین سبب این پژوهشگران انتخاب مستقیم صفت عملکرد دانه برنج تحت شرایط تنش خشکی را مؤثرتر دانسته و انتخاب مستقیم بر اساس این صفت را به‌جای صفات ثانویه پیشنهاد کرده‌اند (Kumar *et al.*, 2008). مطالعات نشان داده است که انتخاب مستقیم برای عملکرد در شرایط تنش شدید، نسبت به انتخاب در شرایط بدون تنش، افزایش عملکرد بالاتری را در پی داشته است (Venuprasad *et al.*, 2008). کارآیی عملکرد نسبی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های بدون تنش و تنش می‌تواند شاخصی برای شناسایی و جداسازی رقم‌های متحمل به خشکی جهت کشت در محیط‌های در معرض خشکسالی باشد (Raman *et al.*, 2012; Tabkhkar *et al.*, 2017).

Fernandez (1992) ژنوتیپ‌ها را بر اساس میزان عملکردشان در شرایط تنش و عدم تنش به چهار گروه تقسیم کرد: ژنوتیپ‌هایی که در هر دو محیط تنش و بدون تنش عملکرد خوبی دارند (A)، ژنوتیپ‌هایی که تنها در محیط بدون تنش عملکرد بالایی دارند (B)، ژنوتیپ‌هایی که در محیط تنش عملکرد خوبی دارند (C) و ژنوتیپ‌هایی که در هر دو محیط تنش و بدون تنش عملکرد پایینی دارند (D). بر اساس نظر این پژوهشگر، مناسب‌ترین معیار برای گزینش، معیاری است که قادر به تشخیص گروه A از سایر گروه‌ها باشد. پژوهشگران، جهت شناسایی و گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش، شاخص‌های خشکی زیادی را بر اساس یک رابطه ریاضی بین عملکرد دانه در شرایط تنش و غیرتنش پیشنهاد داده‌اند که این شاخص‌ها بر اساس تحمل و یا حساسیت به خشکی ژنوتیپ‌ها هستند. به نظر Moosavi *et al,* (2008) مشکل عمدۀ شاخص‌های قدیمی‌تر، آن است که به‌راحتی نمی‌توانند گروه‌های فرناندزی را جداسازی کنند؛ به همین دلیل، وی و همکارانش و سایر پژوهشگران، شاخص‌های جدیدتری را جهت گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش پیشنهاد کرده‌اند.

Biosci *et al,* (2017) در بررسی عملکرد گندم دوروم شاخص‌های MP، GMP، HM و TOL را مناسب‌ترین شاخص‌ها جهت جداسازی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی تشخیص دادند. Souri & Dehghani (2006) بامطالعه بر روی ۲۵ ژنوتیپ نخود گزارش کردند که سه شاخص تحمل به تنش STI، GMP و MP نسبت به یکدیگر، دارای بالاترین ضرایب همبستگی بوده و برای جداسازی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی مناسب هستند. Vafaei *et al,* (2019) بامطالعۀ بر روی عملکرد دانۀ ۷۳ ژنوتیپ عدس، همبستگی شدید مثبت و معنی‌داری را بین عملکرد دانه تحت هر دو شرایط (تنش و بدون تنش) با شاخص‌های GMP، STI ، HM و SNPI گزارش کرده و این شاخص‌ها را مناسب‌ترین شاخص‌ها برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی دانسته‌اند.

با توجه به جایگاه و اهمیت حبوبات و به‌ویژه گیاه عدس در ایران و لزوم مواجهه با تنش فزایندۀ خشکی در کشور، پژوهش حاضر باهدف گزینش و معرفی ژنوتیپ‌های عدس متحمل به خشکی، با تأکید بر مقایسۀ شاخص‌های قدیمی و جدید تحمل به تنش و روابط بین آن‌ها انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی، واقع در ۱۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد با عرض جغرافیایی "۲۸ '۱۸ °۳۶ شمالی و طول جغرافیایی "۳۸ '۴۰ °۵۹ شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا اجرا گردید. آب‌وهوای این منطقه بر اساس روش آمبرژه، خشک سرد، حداکثر و حداقل دمای مطلق سالانه منطقه به ترتیب ۴۳/۸ و ۲۱- درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه در این منطقه ۲۳۴ میلی‌متر است (Iran Meteorological Organization, 2018). شکل ۱، مشخصات هواشناسی محل آزمایش، در سال زراعی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

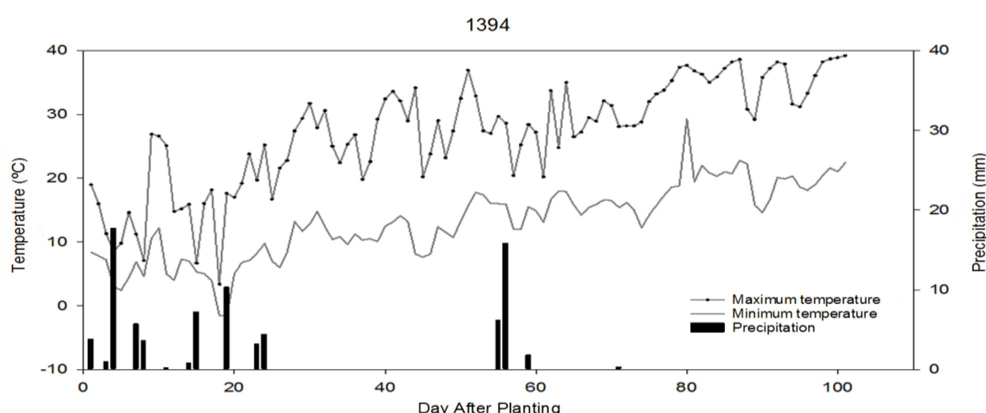
این تحقیق، در ادامه پژوهش سال قبل همین پژوهشگر (Vafaei *et al.*, 2019) صورت گرفت که در آن، ۷۳ ژنوتیپ عدس تهیه‌شده از بانک بذر دانشگاه فردوسی مشهد (شامل بخشی از توده‌های بومی، لاین‌ها و ارقام موجود در کشور و همچنین نمونه‌هایی از سایر کشورها) در دو قطعه مجزا و تحت شرایط تنش و عدم تنش خشکی کشت شدند. پس از مشخص شدن عملکرد نهایی ژنوتیپ‌ها، با بهره‌گیری از ۱۰شاخص قدیم و جدید تحمل به تنش و ترسیم نمودار سه‌بعدی، نمودار بای‌پلات و دندروگرام، میزان تحمل به تنش خشکی ژنوتیپ‌ها مشخص گردید. سپس هشت ژنوتیپ متحمل‌تر و یک ژنوتیپ

۱. International Rice Research Institute, IRRI

حساس‌تر به تنش خشکی (MLC121) از بین آن‌ها انتخاب و در این آزمایش مورد بررسی بیشتر قرار گرفتند (جدول ۱). آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، تحت دو شرایط رطوبتی عدم تنش خشکی (تأمین ۱۰۰درصد نیاز آبی گیاه) و تنش خشکی (تأمین ۴۰درصد نیاز آبی گیاه) با سه تکرار اجرا گردید.

قبل از انجام عملیات کاشت، از خاک مزرعه در عمق ۳۰سانتی‌متری نمونه‌برداری شد و مقادیر pH، درصد ماده آلی، EC، عناصر ماکرو (N، P و K) و همچنین نوع بافت خاک تعیین گردید (جدول ۲) که بر همین اساس به ترتیب، مقدار ۳۵، ۳۰ و ۴۵ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات آمونیوم، سولفات پتاسیم و نیترات آمونیوم به خاک اضافه شده و با آن مخلوط گردید.

پس از انجام عملیات آماده‌سازی زمین، کاشت در تاریخ ۲۳ اسفندماه سال ۱۳۹۳ در وسط پشته انجام گردید. در هر کرت، پنج ردیف به طول سه متر و بافاصلۀ بین ردیف ۵۰سانتی‌متر منظور گردید و بذور بر روی پشته‌ها، در عمق سه‌سانتی‌متری و با تراکم ۲۰۰ عدد بذر در مترمربع کشت شدند. آبیاری بر اساس تخلیه رطوبتی خاک در منطقه ریشه (تفاوت بین رطوبت خاک منطقه ریشه در نقطه ظرفیت زراعی و رطوبت زمان آبیاری) صورت پذیرفت.



شکل ۱- بارندگی و دمای حداکثر و حداقل روزانۀ ایستگاه هواشناسی مشهد در طول فصل رشد عدس (۲۳ اسفند ۱۳۹۳ تا اول تیرماه ۱۳۹۴)

Fig. 1. Daily precipitation and maximum and minimum temperature of Mashhad meteorological station during the lentil growing season (14 March-22 June 2015)

جدول ۱- مشخصات ژنوتیپ‌های عدس مورد آزمایش

Table 1. Characteristics of lentil genotypes in experiment

شماره No.	نام ژنوتیپ[1] Genotype Code (MLC[2])	منشأ Origin	
1	MLC088	آشخانه	Ashkhaneh
2	MLC239	ILL5729	ICARDA
3	MLC356	ایران	Iran
4	MLC121	گیلان	Gilan
5	MLC352	ایران	Iran
6	MLC363	ایران	Iran
7	MLC025	گناباد	Gonabad
8	ILL857	ایکاردا	ICARDA
9	Cabralinta	ایکاردا	ICARDA

۱- کُد بذر در بانک بذر پژوهشکدۀ علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد

۲. Mashhad Lentil Collection (MLC)

جدول ۲- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2. Physio-chemical properties of experimental soil

ماده آلی (٪) Organic matter (%)	کربن آلی (٪) Organic carbon (%)	پتاسیم (پی‌پی‌ام) K (ppm)	فسفر (پی‌پی‌ام) P (ppm)	نیتروژن (درصد) N (%)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس‌بر‌متر) EC (dS.m^{-1})	شاخص واکنش pH	جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) ρb (g.cm^{-3})	بافت خاک Soil texture
1.00	0.58	225	12.3	0.068	0.445	7.83	1.38	سیلت لوم Silt

با توجه به این‌که عمق آبیاری برای تیمار بدون تنش (تأمین ۱۰۰درصد نیاز آبی) در هر بار آبیاری معادل مقدار نیاز آبی خالص گیاه است، میزان آب موردنیاز جهت جبران کمبود رطوبت خاک در منطقۀ ریشه تا حد ظرفیت زراعی، بر اساس رابطه ۱ محاسبه گردید (Alizadeh, 2008).

رابطه ۱: $$D=(\theta_{fc}-\theta_i)*\rho_b*10D_{rz}$$

در این رابطه، D عمق آبیاری (میلی‌متر)، ρ_b جرم مخصوص ظاهری خاک، θ_{fc} رطوبت وزنی خاک در حالت اشباع (٪)، θ_i رطوبت وزنی موجود خاک (٪) و D_{rz} عمق توسعه ریشه (سانتی‌متر) است. برای به‌دست‌آوردن عمق توسعه ریشه در هر مرحله از رشد، از گیاهان کاشته‌شده در کنار ردیف‌های حاشیۀ کرت، نمونه‌برداری به‌عمل آمد و عمق توسعۀ ریشه اندازه‌گیری شد. زمان‌بندی آبیاری بر اساس محاسبات مربوط به کاهش رطوبت در منطقۀ ریشه در حد آب سهل‌الوصول (PWP) انجام شد. در این روش، در تیمار آبیاری کامل، هرگاه متوسط رطوبت موجود در ناحیۀ ریشه به مرز پایین آب سهل‌الوصول می‌رسید، آبیاری بعدی صورت می‌گرفت. حد پژمردگی دائم و مرز پایین رطوبت سهل‌الوصول نیز بر اساس روابط ۲ و ۳ محاسبه گردید (Alizadeh, 2008).

رابطه ۲: $$\theta_{pwp}=(2.3+.37(\theta_{fc}*100))/100$$

رابطه ۳: $$\theta_c=\theta_{fc}-(MAD*(\theta_{fc}-\theta_{PWP}))$$

در این روابط، θ_{PWP} حد پژمردگی دائم (٪)، θ_c مرز پایینی رطوبت سهل‌الوصول و MAD ضریب حداکثر تخلیه مجاز است که این ضریب برای عدس ۵۰ گزارش گردیده است (USDA, 2016). برای اندازه‌گیری دقیق رطوبت کرت‌های مختلف و تعیین زمان دقیق آبیاری، در هر کرت، حسگر رطوبت‌سنج دیجیتالی REC-55 به‌طور ثابت نصب شد و رطوبت خاک به‌طور مداوم توسط این دستگاه و به‌طور همزمان به‌روش وزنی اندازه‌گیری گردید. مقدار آب لازم جهت تیمار تنش (تأمین ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه) نیز بر اساس میزان آب موردنیاز برای تیمار غیرتنش محاسبه گردید. جهت اعمال دقیق تیمار آبی و توزیع یکنواخت آب، از سیستم آبیاری قطره ای نواری[۱] بافاصله خروجی ۱۰سانتی‌متر استفاده شد. به‌منظور جلوگیری از انتقال آب به خارج از محدودۀ کرت آزمایشی، ابتدا و انتهای هر شیار بسته شد و مقدار آب ورودی برای هر تیمار به‌وسیله کنتور حجمی و با دقت ۰/۱ لیتر مورد پایش قرار گرفت. در طول دورۀ رشد، مقدار ۳۰میلی‌متر بارندگی مؤثر رخ داد که در محاسبات آبی منظور گردید.

برداشت محصول بر اساس رسیدگی ژنوتیپ‌ها از تاریخ ۲۳خردادماه ۱۳۹۴ آغاز شد. به‌منظور حذف اثر حاشیه، از برداشت دو ردیف کناری هر کرت و ۵۰ سانتی‌متر بالا و پایین هر ردیف صرف نظر شد و بوته‌های باقیمانده هر کرت برداشت و پس از کوبیده‌شدن و جداسازی، عملکرد دانۀ آن‌ها محاسبه گردید. به‌منظور گزینش ژنوتیپ‌های منتخب متحمل به خشکی، از هشت شاخص قدیمی پیشنهادشدۀ پیش از سال ۲۰۰۰ (HM[۲]، TOL[۳]، MP[۴]، STI[۵]، GMP[۶]، YI[۷]، DI[۸] و REI[۹]) و پنج شاخص جدید (SSPI[۱۰]، ATI[۱۱]، SNPI[۱۲]، K₁STI[۱۳] و K₂STI[۱۴]) که بعد از سال ۲۰۰۰ معرفی شده‌اند، استفاده گردید.

---

۱. Tape
۲. Hramonic Mean Index
۳. Tolerance Index
۴. Mean Productivity
۵. Stress Tolerance Index
۶. Geometrical Mean Productivity Index
۷. Yield Index
۸. Drought Resistance Index
۹. Relative Efficiency Index
۱۰. Stress Susceptibility Percentage Index
۱۱. Abiotic Tolerance index
۱۲. Stress Non-stress Production Index
۱۳. Modified Stress Tolerance Index (for water stress condition)
۱۴. Modified Stress Tolerance Index (for optimum condition)

جدول ۳- نام و مشخصات شاخص‌های تحمل به تنش به‌کاررفته در این پژوهش

Table 3. The name and characteristics of stress tolerance indices used in this research

نام اختصاری **Abbreviated name**	نام شاخص **Index name**	رابطه **Formula**	سال معرفی **Proposed year**	شماره منبع **Reference no.**
		شاخص‌های تحمل به تنش پیشنهادشده قبل از سال ۲۰۰۰ **Stress tolerance indices proposed before 2000**		
HM	شاخص میانگین هارمونیک Hramonic Mean Index	$HM = 2(Yp*Ys)/(Yp+Ys)$	1997	23
TOL	شاخص تحمل Tolerance Index	$TOL = (Yp-Ys)$	1981	33
MP	شاخص متوسط باروری Mean Productivity	$MP = (Ys+Yp)/2$	1981	33
STI	شاخص تحمل به تنش Stress Tolerance Index	$STI = (Ys*Yp)/(\bar{Yp})^2$	1992	16
GMP	شاخص میانگین هندسی بهره‌وری Geometrical Mean Productivity Index	$GMP = \sqrt{(Yp*Ys)}$	1992	16
YI	شاخص عملکرد Yield Index	$YI = \bar{Y}s / Ys$	1997	17
DI	شاخص مقاومت به خشکی Drought Resistance Index	$DI = \bar{Y}s*(\bar{Y}s/\bar{Y}p)/Ys$	1998	25
REI	شاخص کارآیی نسبی Relative Efficiency Index	$REI = (Ys/\bar{Y}s)*(Yp/\bar{Y}p)$	1999	20
		شاخص‌های تحمل به تنش پیشنهادشده بعد از سال ۲۰۰۰ **Stress tolerance indices proposed after 2000**		
K_1STI	شاخص تحمل به تنش تعدیل‌شده برای شرایط بدون تنش Modified Stress Tolerance Index (for water stress condition)	$K_1STI = \left[(Yp)^2/(\bar{Y}p)^2\right]*STI$	2002	13
K_2STI	شاخص تحمل به تنش تعدیل‌شده برای شرایط تنش رطوبتی Modified Stress Tolerance Index (for optimum condition)	$K_2STI = \left[(Ys)^2/(\bar{Y}s)^2\right]*STI$	2002	13
SSPI	شاخص درصد حساسیت به تنش Stress Susceptibility Percentage Index	$SSPI = 100*\left[(Yp-Ys)/2(\bar{Yp})\right]$	2008	28

ادامه جدول ۳- نام و مشخصات شاخص‌های تحمل به تنش به‌کاررفته در این پژوهش

Continue of Table 3. The name and characteristics of stress tolerance indices used in this research

ATI	شاخص تنش‌های غیرزنده Abiotic Tolerance Index	$ATI = [\frac{(Yp-Ys)}{(\bar{Yp}-\bar{Ys})}]*[\sqrt{Yp*Ys}]$	2008	28
SNPI	شاخص محصول محیط تنش و غیرتنش Stress Non-stress Production Index	$SNPI = \sqrt[3]{\frac{(Yp+Ys)}{(Yp-Ys)}}*\sqrt[3]{Yp*Ys*Ys}$	2008	28

Yp و Ys: به ترتیب میانگین عملکرد دانۀ هر ژنوتیپ در شرایط عدم تنش و تنش خشکی

$\bar{Yp}$ و $\bar{Ys}$: به ترتیب، میانگین حسابی عملکرد دانۀ ژنوتیپ‌ها تحت شرایط عدم تنش و تنش

Yp and Ys : Average yield of each genotype in non-stress and stress conditions, respectively

$\bar{Yp}$ and $\bar{Ys}$: Mean value of genotypes yield in non-stress and stress conditions, respectively

جدول ۴- میانگین مربعات عملکرد دانه در شرایط غیرتنش و تنش خشکی و شاخص‌های تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های عدس

Table 4. Yield mean squared in non-stress and stress conditions with drought tolerance indices in lentil genotypes

منابع تغییرات S.O.V	df	Yp	Ys	HM	TOL	MP	STI	GMP	SSPI	ATI	SNPI	K_1STI	K_2STI	YI	DI	REI
بلوک Block	2	79351 *	221 ns	4027 ns	2038 ns	481 ns	0.001 ns	3448 ns	0.2 ns	39404 *	3395 ns	0.01 ns	0.01 ns	0.04 **	0.15 ns	0.01 ns
ژنوتیپ Genotype	8	734889 ***	103064 ***	169944 ***	549546 ***	281589 ***	0.118 ***	206885 ***	525.7 ***	1492960 ***	352195 ***	1.14 ***	0.54 ***	0.26 ***	11.28 ***	0.80 ***
خطا Error	16	18850	1447	3795	12029	7667	0.001	7482	10.4	6668	9712	0.004	0.004	0.01	0.04	0.02
ضریب تغییرات CV (%)	-	8.5	6.1	6.9	11.1	7.8	8.2	8.7	10.5	7.7	8.6	12.1	12.6	7.8	5.3	11.8

Yp: عملکرد در شرایط غیرتنش؛ Ys: عملکرد در شرایط تنش؛ HM: میانگین هارمونیک؛ TOL: شاخص تحمل تنش؛ MP: میانگین هندسی؛ STI: شاخص تحمل تنش؛ GMP: میانگین حسابی؛ SSPI: شاخص حساسیت به تنش؛ ATI: شاخص تنش‌های غیرزنده؛ SNPI: شاخص محصول محیط تنش و غیرتنش؛ K_1STI: شاخص تحمل به تنش اصلاح‌شده ۱؛ K_2STI: شاخص تحمل به تنش اصلاح‌شده ۲؛ YI: شاخص عملکرد؛ DI: شاخص مقاومت به خشکی؛ REI: شاخص کارایی نسبی

Yp: Potential Yield; Ys: Stress Yield; HM: Harmonic Mean; TOL: Tolerance Index; MP: Mean Productivity; STI: Stress Tolerance Index; GMP: Geometrical Mean Productivity Index; SSPI:Stress Susceptibility Percentage Index; ATI:Abiotic Tolerance Index; SNPI:Stress-Non stress Production Index; K_1STI: K_1(Modified) Stress Tolerance Index; K_2STI: K_2(Modified) Stress Tolerance Index

جدول ۵- میانگین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش خشکی و شاخص‌های تحمل به خشکی محاسبه‌شده و رتبۀ آن‌ها در ژنوتیپ‌های عدس

Table 5. Mean grain yield in non-stress and stress conditions and calculated drought resistance indices and their ranks in lentil genotypes

Genotype NO.	Yp (kg/h)	Ys (kg/h)	HM	TOL	MP	STI	GMP	SSPI	ATI	SNPI	K_1STI	K_2STI	YI	DI	REI
1	1715 (3)	487 (8)	759 (6)	1228 (7)	1101 (5)	0.32 (6)	914 (6)	38 (3)	1132 (3)	900 (8)	0.36 (5)	0.19 (6)	0.78 (8)	5.39 (3)	0.83 (6)
2	1995 (2)	640 (5)	969 (4)	1355 (8)	1318 (2)	0.49 (4)	1130 (4)	42 (2)	1545 (2)	1167 (5)	0.74 (2)	0.51 (4)	1.02 (5)	5.55 (2)	1.26 (4)
3	2621 (1)	787 (3)	1211 (1)	1834 (9)	1704 (1)	0.79 (1)	1436 (1)	57 (1)	2657 (1)	1445 (3)	2.07 (1)	1.25 (1)	1.26 (3)	7.79 (1)	2.04 (1)
4	993 (9)	288 (9)	447 (9)	705 (3)	641 (9)	0.11 (9)	535 (9)	22 (7)	380 (8)	531 (9)	0.04 (9)	0.02 (9)	0.46 (9)	3.05 (6)	0.28 (9)
5	1488 (6)	670 (4)	924 (5)	818 (4)	1079 (6)	0.38 (5)	998 (5)	25 (6)	824 (6)	1208 (4)	0.32 (6)	0.44 (5)	1.07 (4)	2.95 (7)	0.99 (5)
6	1529 (5)	504 (7)	758 (7)	1025 (6)	1016 (7)	0.29 (7)	878 (7)	32 (4)	907 (5)	916 (7)	0.26 (7)	0.19 (7)	0.81 (7)	4.14 (4)	0.76 (7)
7	1715 (4)	807 (2)	1097 (3)	908 (5)	1261 (3)	0.53 (2)	1176 (2)	28 (5)	1078 (4)	1458 (2)	0.6 (3)	0.88 (3)	1.29 (2)	3.25 (5)	1.37 (2)
8	1021 (8)	570 (6)	732 (8)	451 (1)	796 (8)	0.22 (8)	763 (8)	14 (9)	347 (9)	1054 (6)	0.09 (8)	0.18 (8)	0.91 (6)	1.63 (9)	0.58 (8)
9	1474 (7)	876 (1)	1099 (2)	598 (2)	1175 (4)	0.49 (3)	1136 (3)	18 (8)	685 (7)	1644 (1)	0.41 (4)	0.97 (2)	1.4 (1)	2.21 (8)	1.28 (3)
میانگین	1616.7	625.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LSD (1%)	327.43	90.73	146.91	261.56	208.81	0.08	206.28	7.70	194.74	235.02	0.16	0.16	0.19	0.50	0.29

شرح اختصارات در زیرنویس جدول ۳ آورده شده است – اعداد داخل پرانتز، رتبه هر ژنوتیپ است.

The abbreviations are listed below table3 - The numbers inside parentheses are the rank of each genotype

تجزیه واریانس بر اساس الگوی طرح بلوک‌های کامل تصادفی بر روی عملکرد دانه در هر دو شرایط انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح یک درصد محاسبه گردید. برای تعیین روابط بین عملکرد دانه در شرایط تنش و عدم تنش و شاخص‌های تحمل، از ضرایب همبستگی ساده (پیرسون) استفاده شد. همچنین جهت تعیین فاصله ژنتیکی (میزان خویشاوندی) ژنوتیپ‌های موردبررسی، از تجزیه خوشه‌ای به‌روش Ward استفاده گردید. برای انجام محاسبات آماری از نرم‌افزار SAS 9.3، برای خوشه‌بندی ژنوتیپ‌ها و ترسیم دندروگرام از نرم‌افزار Minitab 17، برای ترسیم نمودار هواشناسی از SigmaPlot 14 و برای ترسیم نمودارهای سه‌بعدی و بای‌پلات از نرم‌افزار Statgraphics XVII-X64 استفاده گردید.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج، ازنظر عملکرد دانه، اختلاف معنی‌داری ($p\leq۰/۰۱$) بین ژنوتیپ‌ها در هر دو تیمار تنش و بدون تنش مشاهده شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش، به ترتیب مربوط به ژنوتیپ‌های MLC356 و Cabralinta با عملکرد ۲۶۲۱ و ۸۷۶ کیلوگرم در هکتار است. کمترین عملکرد دانه در هر دو شرایط (بدون تنش و تنش) نیز در ژنوتیپ MLC121 با عملکرد ۹۹۳ و ۲۸۸ کیلوگرم در هکتار مشاهده گردید. میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط غیرتنش ۱۶۱۶/۷کیلوگرم در هکتار و در شرایط تنش ۶۲۵/۴ کیلوگرم بر هکتار بود که در شرایط تنش خشکی، کاهشی معادل ۶۱/۳ درصد را نشان داد (جدول ۵). این کاهش عملکرد، ناشی از تأثیر قابل‌ملاحظۀ تنش خشکی اعمال‌شده بر روی عملکرد بود. همچنین این کاهش، گویای آن است که در صورت کشت ژنوتیپ‌های یادشده در مشهد، برای رسیدن به عملکرد مطلوب، باید آبیاری به میزان کافی صورت گیرد.

به عقیدۀ Blum (1988) برای انتخاب بهترین شاخص‌ها جهت غربالگری ژنوتیپ‌های مورد آزمایش، باید به دنبال شاخص‌هایی بود که با عملکرد گیاه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش، همبستگی مثبت و معنی‌داری داشته باشند که این همبستگی، نشان‌دهندۀ کارآمدی شاخص‌های انتخاب‌شده در ارزیابی تحمل به خشکی ژنوتیپ‌ها است. بر همین اساس، ضریب همبستگی پیرسون بین عملکرد دانۀ ژنوتیپ‌ها در شرایط غیرتنش و تنش با شاخص‌های تحمل به خشکی، محاسبه شده و مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۶). نتایج نشان داد که بین عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش، همبستگی معنی‌داری وجود ندارد. این قضیه نشان‌دهنده آن است که در بین ژنوتیپ‌های انتخابی، رفتارهای متفاوتی نسبت به تنش آبی وجود دارد. عملکرد در شرایط بدون تنش، ارتباط مثبت و معنی‌داری را با شاخص‌های DI، GMP، HM، MP، REI، STI، TOL، K_1STI، K_2STI، ATI و SSPI نشان داد. همبستگی بین عملکرد در شرایط بدون تنش، نیز با شاخص‌های HM، MP، STI، GMP، SNPI، K_2STI، YI و REI مثبت و معنی‌دار گردید. بر این اساس، شاخص‌های قدیمی STI، GMP، REI، HM و MP و شاخص جدید K_2STI که با عملکرد دانه در هر دو شرایط (تنش و عدم تنش) دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار بودند، به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها جهت گزینش ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط محیطی انتخاب شدند. این روش گزینش شاخص‌ها پیش از این نیز توسط پژوهشگران دیگر مورداستفاده قرارگرفته است؛ به‌عنوان نمونه در مطالعۀ Rahimi *et al,* (2017) بر روی ۱۶۸ لاین اینبرد عدس، مشخص شد که شاخص‌های HM، STI، MP، GMP دارای بالاترین میزان همبستگی با عملکرد دانه در هر دو شرایط غیرتنش و تنش خشکی هستند. آن‌ها در پژوهش خود برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل‌تر از این نتایج بهره گرفته و سه ژنوتیپ برتر را انتخاب کردند. Azizi Chakherchaman *et al,* (2009) در بررسی لاین‌های امیدبخش عدس در شرایط محیطی تنش و بدون تنش به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های HM، GMP، MP و STI در هر دو شرایط محیطی، همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه داشته و این شاخص‌ها به‌خوبی می‌توانند ژنوتیپ های دارای عملکرد بالا در هر دو شرایط محیطی (تنش و بدون تنش) را شناسایی کنند. Aktaş (2016) نیز در مطالعۀ ۳۳ ژنوتیپ گندم، همبستگی مثبت و معنی‌داری را بین عملکرد دانه در شرایط تنش و غیرتنش با شاخص‌های GMP، MP، STI، SNPI، DI و YI گزارش نموده و برای معرفی ژنوتیپ های منتخب، از این شاخص‌ها بهره گرفته است.

Fernandez (1992) ژنوتیپ‌ها را بر اساس میزان عملکرد در شرایط تنش و عدم تنش به چهار گروه A، B، C و D تقسیم کرد. در این پژوهش نیز برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل، نمودار سه‌بعدی Yp و Ys با هر یک از شاخص‌های تحمل برگزیده توسط روش تحلیل همبستگی، ترسیم گردید (شکل‌های ۲ تا ۴).

جدول ۶- ضرایب همبستگی ساده (پیرسون) بین عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش با شاخص‌های تحمل در ژنوتیپ‌های عدس

Table 6. Correlation coefficient between Yp, Ys and tolerance indices in lentil genotypes

	Yp	Ys	HM	TOL	MP	STI	GMP	SSPI	ATI	SNPI	K_1STI	K_2STI	YI	DI
Yp	-													
Ys	0.524	-												
HM	0.751*	0.955**	-											
TOL	0.929**	0.173	0.455	-										
MP	0.966**	0.726*	0.895**	0.803**	-									
STI	0.906**	0.815**	0.943**	0.695*	0.978**	-								
GMP	0.884**	0.861**	0.973**	0.649	0.974**	0.987**	-							
SSPI	0.929**	0.173	0.455	0.999**	0.803**	0.695*	0.649	-						
ATI	0.982**	0.422	0.665	0.953**	0.921**	0.864**	0.816**	0.953**	-					
SNPI	0.512	0.999**	0.948**	0.159	0.715*	0.806**	0.852**	0.159	0.410	-				
K_1STI	0.927**	0.518	0.717*	0.847**	0.905**	0.902**	0.834**	0.847**	0.962**	0.511	-			
K_2STI	0.724*	0.895**	0.938**	0.449	0.855**	0.940**	0.920**	0.449	0.676*	0.894**	0.788*	-		
YI	0.526	0.999**	0.956**	0.175	0.727*	0.816**	0.862**	0.175	0.424	0.999**	0.519	0.895**	-	
DI	0.890**	0.085	0.370	0.993**	0.745*	0.629	0.576	0.993**	0.925**	0.076	0.817**	0.383	0.088	-
REI	0.903**	0.820**	0.946**	0.689*	0.977**	0.999**	0.988**	0.689*	0.860**	0.812**	0.899**	0.942**	0.822**	0.623

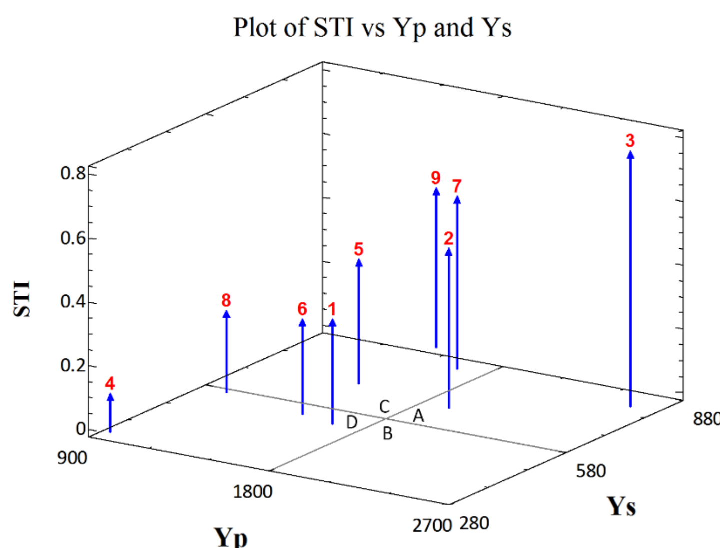
Yp: عملکرد در شرایط غیرتنش؛ Ys: عملکرد در شرایط تنش؛ HM: میانگین هارمونیک؛ TOL: شاخص تحمل تنش؛ MP: میانگین هندسی؛ STI: شاخص تحمل تنش؛ GMP: میانگین حسابی؛ SSPI: شاخص حساسیت به تنش؛ ATI: شاخص تنش‌های غیرزنده؛ SNPI: شاخص محصول محیط تنش و غیرتنش؛ K_1STI: شاخص تحمل به تنش اصلاح‌شده۱؛ K_2STI: شاخص تحمل به تنش اصلاح‌شده۲؛ YI: شاخص عملکرد؛ DI: شاخص مقاومت به خشکی؛ REI: شاخص کارآیی نسبی

Yp: Potential Yield; Ys: Stress Yield; HM: Harmonic Mean; TOL: Tolerance Index; MP: Mean Productivity; STI: Stress Tolerance Index; GMP: Geometrical Mean Productivity Index; SSPI: Stress Susceptibility Percentage Index; ATI: Abiotic Tolerance Index; SNPI: Stress-Non stress Production Index; K_1STI: K_1 (Modified) Stress Tolerance Index; K_2STI: K_2 (Modified) Stress Tolerance Index

در این شکل‌ها، عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط عدم تنش (YP) در محور اول، عملکرد ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش (Ys) در محور دوم و شاخص موردنظر در محور سوم قرار دارند. در این سه شکل، ژنوتیپ‌های MLC356 و MLC025 در ناحیهA قرار گرفتند و ژنوتیپ‌های این ناحیه در هر دو شرایط (تنش و غیرتنش) دارای عملکرد بالا هستند. ناحیهB ویژهٔ ژنوتیپ‌هایی است که در شرایط عدم تنش، عملکرد بالا و در شرایط تنش، عملکرد پایینی دارند که در این پژوهش، هیچ‌یک از ژنوتیپ‌ها در این ناحیه قرار نگرفتند. ژنوتیپ‌های Cabralinta، MLC025 و MLC35 نیز در ناحیهC قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های این ناحیه در شرایط تنش دارای عملکرد بالا و در شرایط غیرتنش دارای عملکرد نسبتاً مطلوبی بودند. ژنوتیپ‌های MLC088، MLC363، ILL857 و MLC121 نیز در ناحیهD قرار گرفتند که ژنوتیپ‌های این ناحیه در هر دو شرایط (تنش و عدم تنش) عملکرد مطلوبی ندارند. شاخصSTI یکی از شاخص‌های تحمل کارآمد بوده و مقدار بالای آن مطلوب است. ترسیم نمودار سه‌بعدی Yp و Ys با شاخص STI (شکل ۲) نشان داد که از بین ژنوتیپ‌های موردبررسی، سه ژنوتیپ MLC356، MLC025 و Cabralinta دارای بالاترین میزان شاخص STI است و بر اساس این معیار، می‌توان سه ژنوتیپ یادشده را به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل‌تر معرفی کرد. انتخاب بر اساس شاخص‌های GMP و REI نیز نتایج مشابهی را در بر داشت که از رسم نمودار سه‌بعدی آن‌ها صرف‌نظر گردید. Fathi *et al,* (2012) در گیاه لوبیا چشم‌بلبلی از شاخص‌های STI، GMP، MP برای بررسی پایداری عملکرد و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و با عملکرد بالا استفاده کرده و بر این اساس، ژنوتیپ‌های برتر را گزینش نمود. Roozrokh *et al,* (2013) پس از مطالعه ژنوتیپ‌های نخود با غربال کردن شاخص‌های کمی مقاومت به خشکی، نشان داد که شاخص‌های STI، GMP، HM و MP ازجمله بهترین شاخص

ها برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی هستند. Tabkhkar *et al,* (2017) در بررسی ۸۳ ژنوتیپ برنج گزارش کرد که از بین ۱۱ شاخص تحمل و حساسیت به تنش، شاخص‌های STI، GMP، MRP و REI با داشتن همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه تحت هر دو شرایط (تنش خشکی و بدون تنش) مناسب‌ترین شاخص‌ها برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی هستند.

شاخص GMP نیز شاخص نسبتاً خوبی برای جداسازی ژنوتیپ‌های متحمل است؛ اما با توجه به این‌که مقدار این شاخص از حاصل‌ضرب Yp در Ys به دست می‌آید، این احتمال وجود دارد که ژنوتیپ‌هایی که در شرایط تنش، دارای عملکرد چندان مطلوبی نیستند، ولی در شرایط غیرتنش دارای عملکرد بسیار بالایی هستند نیز به‌اشتباه، به‌عنوان ژنوتیپ متحمل معرفی شوند. برای رفع این اشکال، Schneider *et al,* (2004) پیشنهاد کردند که در ابتدا ژنوتیپ‌ها بر اساس مقادیر بالای GMP گزینش شوند و پس از آن، به‌منظور حصول اطمینان از پایداری عملکرد در شرایط تنش، از بین ژنوتیپ‌های گزینش‌شده، ژنوتیپ‌هایی که بالاترین مقدار Ys را دارند انتخاب گردند که بر اساس این توصیه، ژنوتیپ‌های Cabralinta و MLC025 که دارای بالاترین میزان GMP بوده و در شرایط تنش به‌ترتیب، بالاترین عملکرد دانه را داشتند، انتخاب شدند.



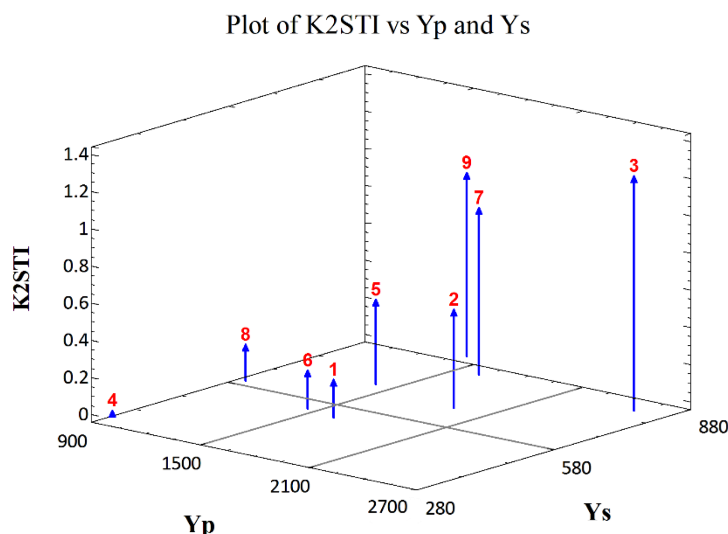
شکل ۲- پراکنش سه‌بعدی برای تعیین ارقام متحمل به خشکی بر اساس عملکرد در شرایط غیرتنش (Yp) و تنش (Ys) و شاخص STI

Fig. 2. Three dimensional plot for determination drought tolerant genotypes based on stress (Ys) and non-stress yield (Yp) with STI index

شاخص K_2STI در اصل، همان شاخص STI است که با اعمال تغییراتی توانسته تا حدود زیادی از نواقص شاخص STI را اصلاح کند. این شاخص توسط Farshadfar & Sutka (2002) پیشنهاد شده و مقادیر بالای آن نشان‌دهندۀ تحمل بیشتر ژنوتیپ به تنش است. شاخص K_2STI به‌خوبی قادر به جداسازی گروه A از B است. ترسیم نمودار سه‌بعدی این شاخص با Yp و Ys (شکل ۳) نشان داد که ژنوتیپ‌های MLC356، Cabralinta و MLC025 بــه ترتیــب دارای بالاترین میزان این شاخص بوده و به جهت داشتن عملکرد بالا در هر دو شرایط (تنش و غیرتنش) برای کشت در هر دو وضعیت مناسب هستند. استفاده از نمودار سه‌بعدی Yp و Ys با شاخص HM نیز نتایج مشابهی را در برداشت.

Goodarzvand Chegini *et al,* (2017) برای گزینش نمونه‌های متحمل نخود از بین ۶۴ ژنوتیپ، از شاخص K_2STI و تعداد دیگری از شاخص‌ها استفاده کرده و همبستگی قوی و مثبتی را بین این شاخص‌ها با عملکرد در شرایط بدون تنش و تنش گزارش کرده‌اند. Anwar *et al,* (2011) نیز در انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی گندم، از شاخص K_2STI استفاده نموده و آن را یکی از برترین شاخص‌ها عنوان کرده‌اند. Sedigh *et al,* (2015) نیز در مطالعۀ خود بر روی ۱۴ ژنوتیپ پنبه، شاخص‌های STI، MP، GMP، K_2STI و K_2STI را به عنوان بهترین شاخص‌ها در انتخاب ژنوتیپ‌های پرمحصول و مقاوم به تنش معرفی کرده است. استفاده از شاخص HM جهت انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل عدس از بین ۱۶۸ ژنوتیپ

نیز توسط Rahimi *et al,* (2017) مورداستفاده قرارگرفته و موجب گزینش پنج ژنوتیپ گردیده است. (2013) Farshadfar *et al,* نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار بین Yp، Ys و شاخص‌های K_1STI، K_2STI، SSPI، ATI، DI و SNPI در گندم گزارش کرده و برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل‌تر از آن‌ها بهره گرفته‌اند.

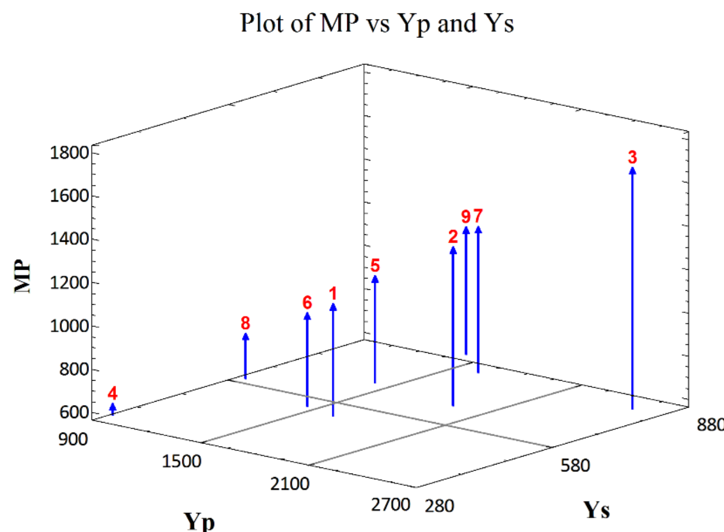


شکل ۳- پراکنش سه‌بعدی برای تعیین ارقام متحمل به خشکی بر اساس عملکرد در شرایط غیرتنش (Yp) و تنش (Ys) و شاخص K_2STI

Fig. 3. Three dimensional plot for determination drought tolerant genotypes based on stress (Ys) and non-stress yield (Yp) with K_2STI index

شاخص MP میانگین عملکرد یک ژنوتیپ در شرایط تنش و غیرتنش است. مقدار بالاتر این شاخص مطلوب بوده و نشان‌دهندهٔ تحمل بیشتر ژنوتیپ به تنش است. نتایج حاصل از ترسیم نمودار سه‌بعدی عملکرد غیرتنش، تنش و شاخص MP نشان داد (شکل ۴) که متوسط عملکرد ژنوتیپ‌های MLC356، MLC239 و MLC025 بالاتر از سایر ژنوتیپ‌ها بوده و برای کشت در هر دو ناحیه (تنش و غیرتنش) مناسب هستند. پژوهشگران زیادی برای گزینش ژنوتیپ‌های متحمل از این شاخص استفاده کرده‌اند. Mafakheri *et al,* (2015) از شاخص MP به همراه سایر شاخص‌ها برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل لوبیا چشم‌بلبلی استفاده نموده و چهار ژنوتیپ متحمل را معرفی نموده‌اند. Dashtaki *et al,* (2015) بامطالعهٔ عملکرد ۳۳ ژنوتیپ لوبیا و بررسی شاخص‌های مقاومت به خشکی، اظهار داشتند که STI و MP از مناسب‌ترین شاخص‌ها برای غربال‌سازی ژنوتیپ‌های برتر هستند. (2014) Gholinezhad *et al,* نیز از شاخص MP و شاخص‌های دیگر جهت گزینش ژنوتیپ‌های متحمل آفتابگردان به تنش خشکی، از بین ۵۶ژنوتیپ، استفاده نموده‌اند. Siahsar *et al,* (2010) شاخص های MP، GMP و STI را بهترین شاخص‌ها جهت غربالگری ۱۸ ژنوتیپ عدس دانسته‌اند. شاخص MP که میانگین حسابی عملکرد دانه در دو شرایط (غیرتنش و تنش) است، ممکن است در مواردی که عملکرد در شرایط غیرتنش خیلی زیاد و عملکرد در شرایط تنش نسبتاً کم باشد، ژنوتیپی را اشتباهاً به‌عنوان ژنوتیپ برتر انتخاب کند؛ به‌عبارت‌دیگر، هنگامی‌که اختلاف نسبی زیادی بین عملکرد تنش و غیرتنش وجود داشته باشد، شاخص MP دارای یک اُریب به‌طرف پتانسیل عملکرد خواهد بود. Rosielle & Hamblin (1981) که خود، پیشنهاددهندهٔ این شاخص بوده‌اند، این شاخص را به‌طور کامل قادر به جداسازی گروه A از B ندانسته و توصیه کرده‌اند که در چنین مواردی، از شاخص‌های دیگر نیز جهت گزینش صحیح بهره گرفته شود.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، زمانی که گزینش لاین‌های متحمل به خشکی، به‌طور جداگانه و به‌تنهایی و بر مبنای تک‌تک شاخص‌ها صورت بگیرد، می‌تواند گاهی نتایج ضد و نقیضی را به دنبال داشته باشد. از سوی دیگر نمودارهای سه‌بعدی فقط قادر به نمایش رابطهٔ سه متغیر هستند. برای رفع این مشکل، درصورتی‌که بررسی رابطهٔ بیش از سه متغیر مدنظر باشد، باید از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و رسم نمودار چندمتغیرهٔ موسوم به نمودار بای‌پلات استفاده نمود.



شکل ۴- پراکنش سه‌بعدی برای تعیین ارقام متحمل به خشکی بر اساس عملکرد در شرایط غیرتنش (Yp) و تنش (Ys) و شاخص MP

Fig. 4. Three dimensional plot for determination drought tolerant genotypes based on stress (Ys) and non-stress yield (Yp) with MP index

در این روش، شاخص‌هایی که بیشترین همسویی را با یکدیگر داشته باشند، به‌عنوان یک مؤلفه در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش نیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از شاخص‌های تحمل به تنش خشکی و عملکرد گیاه در دو شرایط (تنش و غیرتنش) انجام گرفت (جدول ۷)؛ بنا بر این جدول، مؤلفه اول به‌تنهایی بخش زیادی (۷۷/۹ درصد) از کل تغییرات را توجیه نمود و با عملکرد در شرایط تنش، غیرتنش و ۱۳ شاخص مقاومت و تحمل، همبستگی مثبت و بالایی را نشان داد. با توجه به این مطلب، مقادیر زیاد این مؤلفه مطلوب بوده و با افزایش مقدار این مؤلفه، عملکرد دانه در هر دو حالت (تنش و عدم تنش) افزایش می‌یابد؛ درنتیجه، این مؤلفه ژنوتیپ‌هایی را که در شرایط غیرتنش، پتانسیل عملکرد بالایی داشته و به تنش خشکی نیز تحمل نسبی داشته باشند، انتخاب می‌کند. این مؤلفه را می‌توان «مؤلفه پتانسیل عملکرد و تحمل به تنش» نام‌گذاری نمود. مؤلفه دوم نیز به‌تنهایی ۲۰/۷درصد از تغییرات را توجیه کرد. این مؤلفه با عملکرد در شرایط بدون تنش، رابطه مثبت ولی با عملکرد در شرایط تنش و شاخص‌های HM، SNPI، YI، HM، K_2STI، GMP، STI و REI رابطه منفی داشت. اگر مؤلفه دوم افزایش یابد، ژنوتیپ‌هایی انتخاب می‌شوند که در شرایط غیرتنش دارای عملکرد زیاد و در شرایط تنش، دارای عملکرد کم باشند. مقدار کم این مؤلفه مطلوب بوده و این مؤلفه را می‌توان «مؤلفه حساسیت به تنش» نام‌گذاری کرد. بر اساس این دو مؤلفه (جدول ۷) می‌توان چهار شاخص SNPI، YI، HM، و K_2STI که به ترتیب بالاترین میزان همبستگی را با عملکرد گیاه در هر دو شرایط محیطی داشتند، به‌عنوان بهترین شاخص‌ها جهت جداسازی ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا در هر دو شرایط (تنش و غیرتنش) معرفی نمود.

بای‌پلات نیز ابزار مفیدی برای تجزیه اطلاعات بوده و ارزیابی نظری ساختار یک ماتریس بزرگ دوطرفه را ممکن می‌سازد. با استفاده از روش ترسیمی بای‌پلات می‌توان روابط بین ژنوتیپ‌ها و شاخص‌های تحمل را در یک‌شکل واحد ترسیم کرد. از آنجا که بر اساس جدول ۷، دو مؤلفه اول، درمجموع ۹۸/۶ درصد از تغییرات موجود بین داده‌ها را توجیه کردند، ترسیم بای‌پلات بر اساس دو مؤلفه اول کافی بوده و نیازی به دخالت مؤلفه‌های دیگر نبود. شکل ۵ نیز بر اساس دو مؤلفه اول ترسیم گردید. در این شکل، شاخص‌های قدیمی YI، HM، GMP، REI و STI و شاخص‌های جدید SNPI و K_2STI در ناحیه D قرار گرفتند. این شاخص‌ها همگی با شاخص Ys هم‌جهت بوده و با آن همبستگی مثبت داشتند. بر اساس این نمودار، شاخص‌های ناحیهD را می‌توان به‌عنوان مطلوب‌ترین شاخص‌ها جهت گزینش ژنوتیپ‌های متحمل در شرایط تنش و دارای عملکرد بالا در شرایط غیرتنش معرفی نمود.

جدول ۷- مقادیر ویژه، بردارهای ویژه و سهم تجمعی شاخص‌های تحمل و عملکرد در شرایط غیرتنش و تنش خشکی در ژنوتیپ‌های عدس

Table 7. Eigen values, vector values and cumulative variance of tolerance indices, Yp and Ys in lentil genotypes

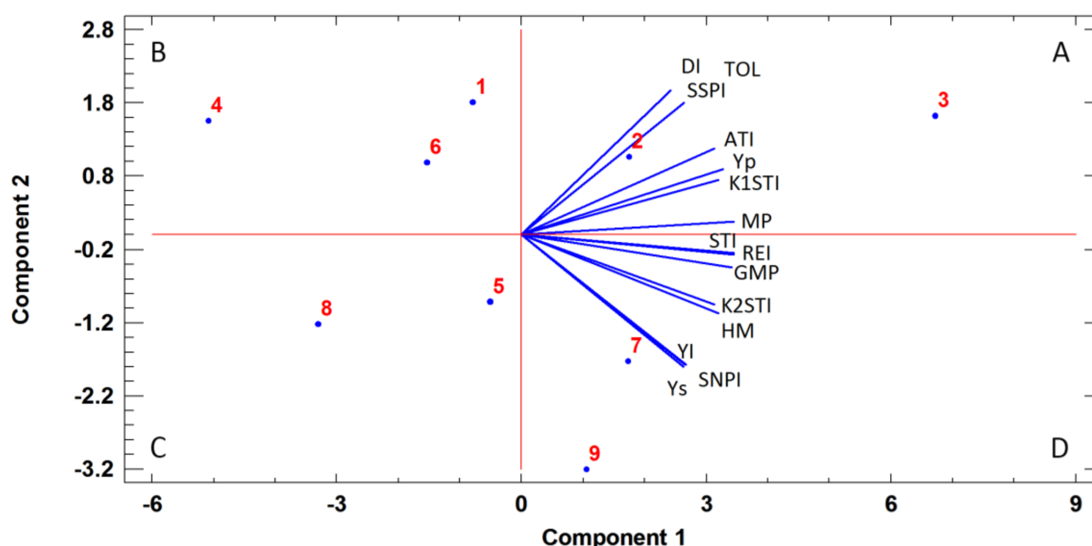
Component مؤلفه	Eigen values مقادیر ویژه	Cumulative of variance (%) درصد سهم تجمعی	Yp	Ys	HM	TOL	MP	STI	GMP	SSPI	ATI	SNPI	K1STI	K2STI	YI	DI	REI
1	11.5	77.9	0.28	0.23	0.27	0.22	0.29	0.29	0.29	0.22	0.27	0.22	0.27	0.27	0.23	0.21	0.29
2	3.2	98.6	0.18	-0.36	-0.21	0.36	0.04	-0.05	-0.09	0.36	0.23	-0.36	0.15	-0.19	-0.35	0.39	-0.05

Yp: عملکرد در شرایط غیرتنش؛ Ys: عملکرد در شرایط تنش؛ HM: میانگین هارمونیک؛ TOL: شاخص تحمل تنش؛ MP: میانگین هندسی؛ STI: شاخص تحمل تنش؛ GMP: میانگین حسابی؛ SSPI: شاخص حساسیت به تنش؛ ATI: شاخص تنش‌های غیرزنده؛ SNPI: شاخص محصول محیط تنش و غیرتنش؛ K_1STI: شاخص تحمل به تنش اصلاح‌شده۱؛ K_2STI: شاخص تحمل به تنش اصلاح‌شده۲؛ YI: شاخص عملکرد؛ DI: شاخص مقاومت به خشکی؛ REI: شاخص کارآیی نسبی

Yp: Potential Yield; Ys: Stress Yield; HM: Harmonic Mean; TOL: Tolerance Index; MP: Mean Productivity; STI: Stress Tolerance Index; GMP: Geometrical Mean Productivity Index; SSPI: Stress Susceptibility Percentage Index; ATI: Abiotic Tolerance Index; SNPI: Stress-Non stress Production Index; K_1STI: K_1 (Modified) Stress Tolerance Index; K_2STI: K_2 (Modified) Stress Tolerance Index

زاویه بین بردارها، میزان همبستگی بین متغیرها را نشان می‌دهد. وجود زاویۀ تند بین Ys و شاخص‌های SNPI و YI بیانگر وجود همبستگی شدید و مثبت این شاخص‌ها با عملکرد در شرایط تنش است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گزینش بر اساس این دو شاخص می‌تواند منجر به انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی و دارای عملکرد نسبتاً بالا در شرایط شود. بر این اساس، می‌توان ژنوتیپ‌های Cabralinta، MLC025 و MLC356 که به‌ترتیب با دو شاخص یادشده، بیشترین هم‌جهتی را دارند، به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر معرفی نمود. نتایج این گزینش، با نتایج حاصل از روش گزینش ژنوتیپ‌های متحمل‌تر به‌وسیلۀ روش ترسیم نمودارهای سه‌بعدی (شکل های۲ تا ۴) نیز هم‌خوانی دارد.

Zahedino *et al*, (2013) در مطالعۀ ۲۰ ژنوتیپ امیدبخش جو، وجود چنین زاویه تندی را بین Ys و شاخص SNPI گزارش کرده‌اند. Jalalifar *et al*, (2012) نیز گزارش مشابهی را در مطالعه بر روی ارقام گندم ارائه نموده‌اند.



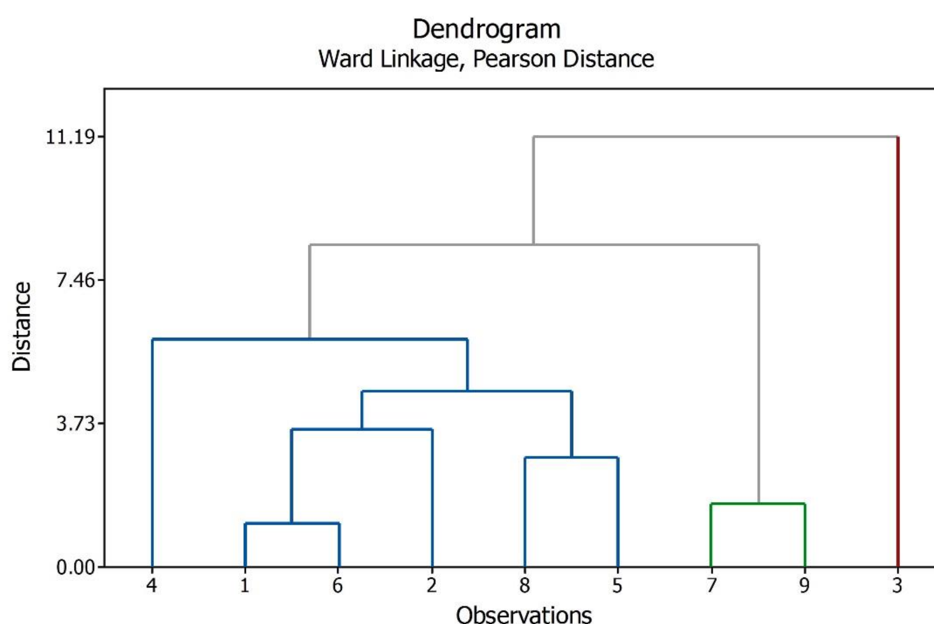
شکل ۵- نمایش بای‌پلات ژنوتیپ‌های عدس در ۱۳ شاخص مقاومت به خشکی بر اساس دو مؤلفه اول و دوم

Fig. 5. Bipolt of lentil genotypes in 13 drought resistance indices based on the first and second components

Yp: عملکرد در شرایط غیرتنش؛ Ys: عملکرد در شرایط تنش؛ HM: میانگین هارمونیک؛ TOL: شاخص تحمل تنش؛ MP: میانگین هندسی؛ STI: شاخص تحمل تنش؛ GMP: میانگین حسابی؛ SSPI: شاخص حساسیت به تنش؛ ATI: شاخص تنش‌های غیرزنده؛ SNPI: شاخص محصول محیط تنش و غیرتنش؛ K_1STI: شاخص تحمل به تنش اصلاح‌شده۱؛ K_2STI: شاخص تحمل به تنش اصلاح‌شده۲؛ YI: شاخص عملکرد؛ DI: شاخص مقاومت به خشکی؛ REI: شاخص کارآیی نسبی

Yp: Potential Yield; Ys: Stress Yield; HM: Harmonic Mean; TOL: Tolerance Index; MP: Mean Productivity; STI: Stress Tolerance Index; GMP: Geometrical Mean Productivity Index; SSPI: Stress Susceptibility Percentage Index; ATI: Abiotic Tolerance Index; SNPI: Stress-Non stress Production Index; K_1STI: K_1 (Modified) Stress Tolerance Index; K_2STI: K_2 (Modified) Stress Tolerance Index

برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس دو شاخص عملکرد در شرایط تنش و غیرتنش و ۱۳ شاخص حساسیت، از تجزیه کلاستر به روش Ward نیز استفاده شد (شکل ۶). در این روش، ژنوتیپ‌ها برحسب میزان شباهتشان به یکدیگر و بر اساس مقدار عددی شاخص‌های تحمل به تنش، به چهار کلاستر جداگانه تقسیم شدند. در این خوشه‌بندی، ژنوتیپMLC356 که نسبت به شرایط تنش، نسبتاً متحمل بوده و در شرایط غیرتنش دارای پتانسیل عملکرد بالایی بود، در کلاستر اول و ژنوتیپ‌های Cabralinta و MLC025 که نسبت به شرایط تنش متحمل بوده و در شرایط غیرتنش دارای پتانسیل عملکرد نسبتاً بالایی بودند، در کلاستر دوم قرار گرفتند. این نتایج، با نتایج به‌دست‌آمده به روش نمودارهای سه‌بعدی (شکل‌های ۲ تا ۴) و روش ترسیم بای‌پلات (شکل ۵) نیز همخوانی داشت. استفاده از تجزیه کلاستر جهت گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها در گیاه لوبیا چشم‌بلبلی توسط Fathi *et al,* (2012)، در گیاه تاج‌خروس توسط Ajayi *et al,* (2016) و در گیاه گندم، توسط Mohammed & Kadhem (2017) مورداستفاده قرارگرفته است.



شکل ۶- دندروگرام حاصل از گروه‌بندی ژنوتیپ‌های عدس بر اساس عملکرد، تحت شرایط عدم تنش (Yp) و شرایط تنش (Ys) و شاخص‌های تحمل به خشکی با استفاده از روش Ward

Fig. 6. Dendrogram obtained by cluster analysis of lentil genotypes bases on Yp, Ys and tolerance indices using Wards method

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان شاخص های YI، SNPI، HM، K_2STI، GMP، REI و STI را که در ناحیهٔ D قرارگرفته و دارای بالاترین میزان همبستگی مثبت و معنی‌دار با یکدیگر و با عملکرد در هر دو شرایط (تنش و عدم تنش) هستند، به‌عنوان شاخص‌های مطلوب جهت گزینش ژنوتیپ‌های متحمل و دارای عملکرد بالا در شرایط غیرتنش و تنش معرفی نمود. همچنین در بین شاخص‌های اشاره‌شده، می توان دو شاخص SNPI و YI را که همبستگی بسیار بالایی (۹۹/۹ درصد) با عملکرد در شرایط تنش داشتند، به‌عنوان مناسب‌ترین و کارآمدترین شاخص‌ها جهت شناسایی و گزینش ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی و دارای عملکرد نسبتاً بالا در شرایط غیرتنش معرفی نمود. در این پژوهش، نتایج حاصل از روش ترسیمی سه‌بعدی، بای‌پلات و تجزیهٔ کلاستر برای گزینش شاخص‌های برتر جهت انتخاب ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و متحمل به خشکی در توافق با یکدیگر بودند.

برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر می‌توان سه ژنوتیپ Cabralinta، MLC025 و MLC356 را که در شرایط غیرتنش دارای بالاترین عملکرد بوده و نسبت به تنش خشکی، متحمل‌تر از سایر ژنوتیپ‌ها بودند، معرفی نمود. درصورتی‌که هدف، معرفی فقط یک ژنوتیپ متحمل باشد، می‌توان ژنوتیپ Cabralinta را که دارای بالاترین عملکرد دانه در شرایط تنش

بوده و نسبت به ژنوتیپ MLC356 به میزان ۱۰/۲ درصد، عملکرد بیشتری داشت، برای کشت در مناطق خشک و دارای تنش شدید معرفی نمود. همچنین برای کشت گیاه عدس در مناطقی که تنش ملایمی دارند، ژنوتیپ MLC356 که هم نسبتاً متحمل به تنش خشکی بوده و هم در شرایط غیرتنش، پرمحصول‌تر از سایر ژنوتیپ‌ها بود، توصیه می‌شود. در انتها، پیشنهاد می‌گردد که بار دیگر، سه ژنوتیپ برگزیده، در شرایط تنش خشکی شدیدتری کشت‌شده و عملکردشان مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع

1. Agricultural Statistics. 2016. Ministry of Agriculture Jihad. First Volume (Crop Products) 21-22. (In Persian).
2. Ajayi, E.O., Sakariyamo, O.S., Okeleye, K.A., Ariyo, O.J., Sakariyawo, O.S., Okeleye, K.A., and Ariyo, O.J. 2016. Preliminary evaluation of grain amaranth (*Amaranthus spp.*) accessions for drought tolerance by multivariate technique. Agronomski Glasnik 78 (5&6): 231-249.
3. Aktaş, H. 2016. Drought tolerance indices of selected landraces and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes derived from synthetic wheats. Applied Ecology and Environmental Research 14(4): 177-189.
4. Alizadeh, A. 2008. Soil, Water, Plant Relationship. Emam Reza University Publication. (In Persian).
5. Anoma, A., Collins, R., and McNeil, D. 2014. The value of enhancing nutrient bioavailability of lentils: the Sri Lankan Scenario. African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development 14(7): 9529-9543.
6. Anwar, J., Subhani, G.M., Hussain, M., Ahmad, J., Hussain, M., and Munir. M. 2011. Drought tolerance indices and their correlation with yield in exotic wheat genotypes. Pakistan Journal of Botany 43(3): 1527–1530.
7. Azizi Chakherchaman, S., Mostafaei, H. Imanparast, L. and Eivazian, M.R. 2009. Evaluation of drought tolerance in lentil advanced genotypes in Ardabil region, Iran. Journal of Food, Agriculture and Environment 7(3&4): 283-288.
8. Biosci, I.J., Semcheddinne, N., Guendouz, A., Oulmi, A., and Hafsi, M. 2017. Screening of wheat (*Triticum durum*) for drought tolerance in semiarid conditions. International Journal of Biosciences 6655: 166-178.
9. Blum, A. 1988. Plant Breeding for Stress Environments. Boca Raton: CRC Press.
10. Dashtaki, M., Ali Pour Yamchi, M., and Bihamta, M.R. 2015. Evaluation of the effects of late season water stress on genotypes of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Iranian Journal of Pulses Research 6(2): 109-122. (In Persian with English Summary).
11. Dixit, S., Singh, A., and Kumar, A. 2014. Rice breeding for high grain yield under drought: a strategic solution to a complex problem. International Journal of Agronomy 2014.
12. FAO. 2018. Available at: http://www.fao.org/iran/news/detail-events/en/c/38535.
13. Farshadfar, E., and Sutka, J. 2002. Screening drought tolerance criteria in maize. Acta Agronomica Hungarica 50(4): 411-416.
14. Farshadfar, E., Poursiahbidi, M.M., and Safavi, S.M. 2013. Assessment of drought tolerance in land races of bread wheat based on resistance-tolerance indices. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research 1(2): 2322-4827.
15. Fathi, M., Bihamta, M.R., Majnoon Hosseini, N., Shah Nejat Boushehry, A., and Ali Pour Yamchi, M. 2012. Screening for terminal drought stress tolerance in cowpea genotypes (*Vigna unguiculata* L.). Iranian Journal of Pulses Research 3(2): 45-54. (In Persian with English Summary).
16. Fernandez, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. 13-18 August 1992, Taiwan. 257-270.
17. Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campaline, R.G., Ricciardi, G.L., & Borghi, B. 1997. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. Canadian Journal of Plant Science 77: 523-531.
18. Gholinezhad, E., Darvishzadeh, R., and Bernousi, I. 2014. Evaluation of drought tolerance indices for selection of confectionery sunflower (*Helianthus anuus* L.) landraces under various environmental conditions. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 42(1): 187-201.
19. Goodarzvand Chegini, K., Fotovat, R., Bihamta, M.R., Omidi, M., and Shahnejant Boushehri, A.A. 2017. Grouping of tolerance indices and response of kabuli and desi type chickpea genotypes to drought stress. Iranian Journal of Field Crop Science 48(3): 647-664. (In Persian).

20. Hossain, A.B.S., Sears, R.G., Cox, T.S., and Paulsen, G.M. 1990. Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. Crop Science 30(3): 622-627.
21. Iran Meteorological Organization. 2018. Available at: http://www.razavimet.ir/fa/node/38.
22. Jalalifar, S., Moosavi, S.S., Abdollahi, M.R., Chaichi, M., and Mazaherylaghab, H. 2012. Evaluation of tolerance to drought stress in some bread wheat cultivars using old and new indices. Plant Production Technology 12(1): 15-26. (In Persian with English Summary).
23. Kafi, M., Borzoee, A., Salehi, M., Kamandi, A., Masoumi, A., and Nabati, J. 2009. Physiology of Environmental Stress in Plant. Jihad-e-Daneshgahi Publishers. p. 502. (In Persian).
24. Kristin, A.S., Serna, R.R., Perez, F.I., Enriquez, B.C., Gallegos, A.J.A., Vallejo, R.P., Wassimi, N., and Kelly, J.D. 1997. Improving common bean performance under drought stress. Crop Science 37(1): 43-50.
25. Kumar, A., Bernier, J., Verulkar, S., Lafitte, H.R., and Atlin, G.N. 2008. Breeding for drought tolerance: direct selection for yield, response to selection and use of drought-tolerant donors in upland and lowland-adapted populations. Field Crops Research 107(3): 221-231.
26. Lan, J. 1998. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. Acta Agriculture Boreali-occid Sinica 7: 85-87.
27. Mafakheri, K., Bihamta, M.R., and Abbasi, A.R. 2015. Screening for drought stress tolerance in cowpea genotypes (*Vigna unguiculata* L.). Iranian Journal of Pulses Research 6(2): 123-138. (In Persian with English Summary).
28. Mohammed, A.K., and Kadhem, F.A. 2017. Screening drought tolerance in bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) using drought indices and multivariate analysis. The Iraqi Journal of Agricultural Sciences 48(Special Issue): 41-51.
29. Moosavi, S.S., Samadi, B.Y., Naghavi, M.R., and Zali, A.A. 2008. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. Desert 12: 165-178.
30. Rahimi, M.H., Houshmand, S., and Khodambashi, M. 2017. Evaluation of lentil recombinant inbred lines using drought tolerance indices. Journal of Crop Eco-Physiology 10-4(40): 907-927. (In Persian with English Summary).
31. Raman, A., Verulkar, S., Mandal, N., Variar, M., Shukla, V., Dwivedi, J., and Mall, A. 2012. Drought yield index to select high yielding rice lines under different drought stress severities. Rice 5(31): 1-12.
32. Reddy, A.R., Chaitanya, K.V., and Vivekanandan, M. 2004. Drought induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. Journal of Plant Physiology 161: 1189-1202.
33. Roozrokh, M., Sabaghpour, S.H., and Armin, M. 2013. Determining the best indices of drought tolerance in chickpea genotypes. Plant Echophysiology 4(2): 25-36. (In Persian with English Summary).
34. Rosielle, A.A., and Hamblin, J. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. Crop Science 21(6): 943-946.
35. Schneider, K.A., Rosales-Serna, R., Ibarra-Perez, F., Cazares-Enriquez, B., Acosta-Gallegos, J.A., Ramirez-Vallejo, P., Wassimi, N., and Kelly, J.D. 2004. Improving common bean performance under drought stress. Crop Sciences 37: 43-50.
36. Sedigh, S., Zabet, M., Ghaderi, M.G., and Samadzadeh, A.R. 2015. Determination of the suitable indices for drought tolerance in cotton genotypes. Iranian Journal of Cotton Researches 3(2): 41-53. (In Persian with English Summary).
37. Siahsar, B.A., Ganjali, S., and Allahdoo, M. 2010. Evaluation of drought tolerance indices and their relationship with grain yield of lentil lines in drought-stressed and irrigated environments. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 4(9): 4336-4346.
38. Souri, J., and Dehghani, H. 2006. A study of chickpea genotypes in water stress conditions. Iranian Journal of Agricultural Sciences 36(6): 1517-1527. (In Persian with English Summary).
39. Tabkhkar, N., Rabiei, B., Samizadeh Lahiji, H., and Hosseini Chaleshtori, M. 2018. Assessment of rice genotypes response to drought stress at the early reproductive stage using stress tolerance indices. Journal of Crop Production and Processing 7(4): 83-106. (In Persian with English Summary).
40. Takeda, S., and Matsuoka, M. 2008. Genetic approaches to crop improvement: responding to environmental and population changes. Nature Reviews Genetics 9(6): 444-457.
41. USDA, N. 2016. Sprinkler Irrigation. National Engineering Handbook (Vol. 623).

42. Vafaei, M.H., Parsa, M., Nezami, A., and Ganjali, A. 2019. Screening for drought tolerance in lentil genotypes (*Lens culinaris* Medik) with emphasis on comparing old and new indices of stress tolerance in order to introduce promising genotypes. Iranian Journal of Pulses Research 10(3). (In Persian with English Summary).
43. Venuprasad, R., Cruz, M.T.S., Amante, M., Magbanua, R., Kumar, A., and Atlin, G. N. 2008. Response to two cycles of divergent selection for grain yield under drought stress in four rice breeding populations. Field Crops Research 107(3): 232-244.
44. Zahedino, M., Moosavi, S.S., Chaichi, M.H., Mazaherylaghab, H., and Abdolahi, R. 2013. Evaluation of tolerance to terminal moisture stress in 20 barley promising lines. Daneshe Zeraat 6(9): 79-92. (In Persian with English Summary).

Iranian Journal of Pulses Research
Vol. 12, No. 1, 2021, p. 187-204 (Research Article)

Selection of sieved drought tolerant lentil (*Lens culinaris* Medik) genotypes via five new tolerance indices in Mashhad conditions

Vafaei[1], M.H., Parsa[2*], M., Nezami[2], A. & Ganjeali[3], A.

1. Controbutions from Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University; m.vafaei@basu.ac.ir
2. Controbutions from Faculty of Agriculture, and Research Center for Plant Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, (parsa@um.ac.ir & nezami@um.ac.ir, respectively)
3. Controbutions from Faculty of Biology, and Research Center for Plant Sciences, Ferdowsi University of Mashhad; ganjeali@um.ac.ir

Received: 9 October 2018
Accepted: 27 December 2018

DOI: 10.22067/ijpr.v12i1.75861

Introduction

Drought is one of the most important stresses which reduce yields of crops and is one of the most important production constraints in arid and semi-arid regions. Iran with annual mean rainfall of 257 mm was classified among the arid regions of the world. Lentil is a pulse crop, rich in proteins and have 18 of the 20 amino acids including all 8 essential amino acids. Thus, lentils play an important role in human diet, especially in low-income people in the developing countries. In Iran, lentil is usually grown in rainfed areas. The average lentil yield in Iran is 476 and 1195 $Kg.ha^{-1}$ in rainfed and irrigated farms, respectively. Identification of drought-tolerant genotypes is essential for cultivation in arid areas. To identify and select tolerant genotypes, researchers have proposed many drought indices based on a mathematical relationship between grain yield under stress and non-stress conditions, which are based on tolerance or susceptibility to drought genotypes. The aim of this study was to identify indicators that can identify high-yielding and drought tolerant genotypes in rainfed conditions of Mashhad.

Materials and Methods

This research was carried out at the Agricultural Research Station, Ferdowsi University of Mashhad, during growth season 2015. In this research, nine genotypes were used that eight genotypes of them were relatively drought tolerant in stress conditions and one genotype (MLC121) susceptible to drought stress were cultivated. These genotypes were selected from 73 genotypes including native populations and ICARDA genotypes in the seed bank of the Ferdowsi University of Mashhad, which were planted in the same plot at last year. Experiments were conducted as completely randomized design with non-stress and drought stress conditions (providing 100% and 40% water requirement of the plant) with three replications.

Results and Discussion

The analysis of variance showed a significant difference between yield genotypes in non-stress and drought stress conditions. Based on the results, in non-stress conditions, MLC356 and MLC121 genotypes produced the highest and lowest grain yields per hectare with 2621 and 993 $kg.ha^{-1}$ respectively. Under stress conditions, Cabralinta and MLC121 genotypes produced the highest and lowest grain yields per hectare with 876 and 288 $kg.ha^{-1}$, respectively. The mean yield of genotypes in non-stress and stress condition were 1616.7 and 625.6 $kg.h^{-1}$, respectively that showed a decrease of 61.3% in water stress condition. Correlation between yields in stress and non-stress condition with tolerance indices showed that the old indices of STI, GMP, REI, HM and MP and the new K_2STI index had a positive and significant correlation with yield in stress and non-stress conditions. The 3D Charts of the K_2STI index with Yp and Ys showed that MLC356, Cabralinta and MLC025 genotypes had the highest rate of this index under non-stress and drought stress. The biplot drawing showed that high yielding genotypes are in D region. In this area, the old indices of YI, HM, GMP, REI, STI, the new indicators of SNPI K_2STI and all of which are consistent with the Ys. The sharp angle between Ys, SNPI and YI indices shows a strong and positive correlation between these indices and

***Corresponding Author:** parsa@um.ac.ir

indicates their superiority in separating high-tolerance genotypes with stress conditions and having relatively high performance in non-stress conditions. Considering this criterion, Cabralinta, MLC025, and MLC356 genotypes which had the highest correlation with the two indices, can be selected.

Conclusion

In all, the results of this study showed that SNPI and YI indices have a high correlation (99.9%) with performance in stress conditions, as well as K_2STI, HM, GMP, REI and STI indices, all of which in D area. They have the most positive and significant correlations with each other and with performance in two conditions of non-stress and stress as the most suitable and effective criteria for identifying and selecting genotypes tolerant to drought stress. In all, if the goal is to introduce three genotypes, Cabralinta, MLC025 and, MLC356 genotypes which are the most susceptible genotypes are suggested compared to the stress conditions, but if the goal is to introduce only one genotype, Cabralinta genotype that has the highest and most stable yield under stress condition and in comparison with MLC356 genotype under stress conditions, 10.2% more yield could be introduced for arid and severe stress areas. For lentil planting in areas with mild stress, a high yielding genotype and tolerant, MLC356 genotype is recommended. It is also suggested that again to increase the accuracy of the experiment, three selected genotypes are again cultivated in the field.

Keywords: Biplot, Cluster Analysis, Correlation, Drought resistance indices